

●原 著

高気圧酸素療法の最大運動後の乳酸濃度に及ぼす影響

石井良昌* 宮永 豊** 下條仁士** 浅野勝己**

男子大学生6名を被検者とし、各被検者の最大酸素摂取量(maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_2\max$)の80~100%の運動強度で、全力で自転車のペダルを漕ぎ、短時間で疲労困憊に至らせた後、(A)大気圧空気吸気(90分)(B)大気圧100%純酸素マスク吸気(45分)後空気吸気(45分)(C)1.3ATA純酸素マスク吸気(45分)後大気圧空気吸気(45分)(D)2.0ATA純酸素マスク吸気(45分)後大気圧空気吸気(45分)で回復させ、両手指尖部より経時的に血液を採取し乳酸値を測定した。最大運動後(運動48分後)の乳酸濃度の回復を比較すると、大気圧においては空気吸気に比べ純酸素吸気を行ってもほとんど影響しなかったが、1.3ATAおよび2.0ATA純酸素吸気により促進された。また、2.0ATAに比べ1.3ATA純酸素吸気の乳酸濃度の回復が速く、運動後の高気圧酸素療法の乳酸除去に及ぼす影響は、促進および遅延因子が複雑に絡み合っているものと推測された。

キーワード：高気圧酸素療法、乳酸、最大運動、最大酸素摂取量

The effect of hyperbaric oxygen therapy on the lactate concentration after maximal exercise

Yoshimasa Ishii* Yutaka Miyanaga** Hitoshi Shimajo** Katsumi Asano**

*Doctoral Program of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

**Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

Six untrained men participated in this study. Each subject completed an initial exhaustive pedaling by Monark bicycle ergometer at load of 4-4.5 kp (80-100% $\dot{V}O_2\max$) for 45 seconds \times 2~3 times. During recovery each subject was on the condition that inhaling (A) room air (90min) at normobaric pressure, (B) 100% O_2 inhalation with respiratory face mask (45min) and room air (45min) at normobaric, (C) 100% O_2 inhalation with mask at 1.3ATA (45min) and room air (45min) at normobaric, (D) 100% O_2 inhalation with mask at 2.0ATA (45min) and room air (45min) at normobaric. Blood lactate concentrations were determined at the time of pre-exercise and 3, 18, 33, 48, 63, 93 minutes after exercise.

Lactate removal was not significant difference

between inhaling room air and 100% O_2 at normobaric. But lactate removal of inhaling 100% O_2 with mask at 1.3ATA and 2.0ATA was faster than inhaling room air at normobaric. Especially there was significant difference between inhaling room air at normobaric and 100% O_2 with mask at 1.3ATA. ($P < 0.05$)

From these findings, it was concluded that lactate removal was not influenced by inhaling 100% O_2 at normobaric, and inhaling pressed oxygen promote lactate removal. But inhaling over-pressed oxygen might disturb to remove lactate.

Keywords :

hyperbaric oxygen therapy
lactate
maximal exercise
maximal oxygen uptake

はじめに

高気圧酸素療法は環境圧を上げ、酸素を付加することによって血漿中の溶解酸素を増加し、末梢組織により多くの酸素を送ることを可能とした方法である。

*筑波大学大学院体育科学研究科

**筑波大学体育科学系

表1 身体的特徴

Age (yr)	23.5±0.8
Height (cm)	172.8±4.2
Weight (kg)	69.0±7.4
$\dot{V}O_2\max$ (ml/min/kg)	55.7±6.3
mean±SD (n=6)	

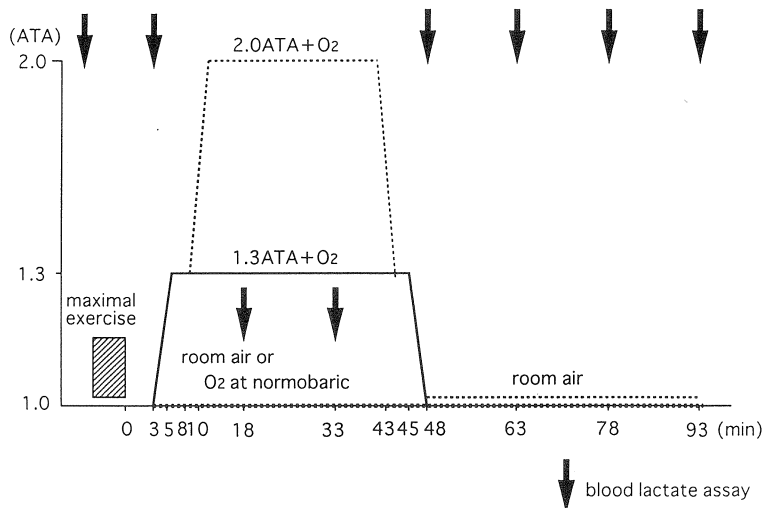


図1 実験プロトコール

今回我々は、高気圧酸素療法の最大運動後の乳酸除去作用に及ぼす影響について明らかにするとともに、高気圧酸素療法を利用して運動後の疲労回復促進に対する可能性について検討した。

対象と方法

被検者は、実験の同意を得られ現在運動トレーニングを行っていない22歳～24歳（平均年齢23.5歳）の男子大学生6名とした（表1）。

あらかじめ、被検者の $\dot{V}O_2\max$ を多段階漸増負荷法によりCOSMED社のK2を用いて測定した。測定にはMonark社製自転車エルゴメーターを用いて30Wから始め、1分毎に30Wずつ負荷を増して疲労困憊に至らせた。なお、ペダルの回転速度は60rpmであった。

各被検者の80～100% $\dot{V}O_2\max$ の運動強度（240

～300W）で被検者は全力で自転車のペダルを漕ぎ、短時間（45秒間×2～3回）で疲労困憊に至らせた。

運動3分後より、被検者は座位にて異なる条件

- (A). 大気圧空気吸気（90分）
- (B). 大気圧純酸素マスク吸気（45分）後大気圧空気吸気（45分）
- (C). 1.3ATA 純酸素マスク吸気（45分）後大気圧空気吸気（45分）
- (D). 2.0ATA 純酸素マスク吸気（45分）後大気圧空気吸気（45分）

で回復させ、運動前および運動3分後、18分後、33分後、48分後、63分後、93分後、の乳酸値を測定した。乳酸値は、両手指尖部より血液を採取し乳酸分析器（YSI社のSPORTS1500）で測定し

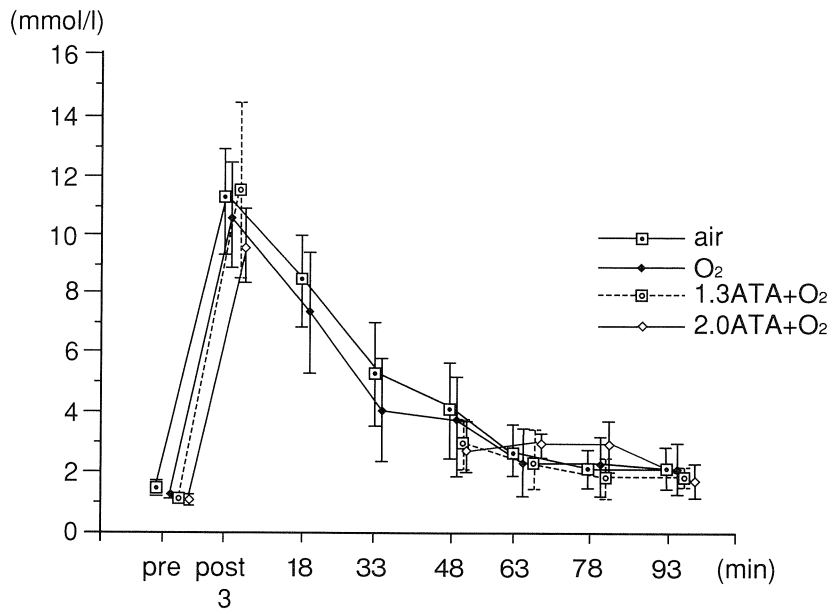


図2 最大運動後の血液乳酸濃度の回復

た。なお、運動前には軽いストレッチ体操を行ったが、運動後には行わなかった。また、高気圧チャンパー内での血液採取は困難であったため、1.3 ATA および2.0ATA 純酸素吸気下での乳酸値（運動18分後、33分後）は測定できなかった。

高気圧酸素療法装置はHYOX社のモデルHTUを使用した。HTUの装置は人が1人座位にて入ることが可能なチャンパーを有しており、チャンパー内の体積は1200ℓである。被検者はホースにつながったマスクより100%酸素を吸気し、呼吸はホースより外気に廃棄された。

高気圧酸素療法のプロトコールは図1のように行い、呼吸はとくに意識しない程度の強さとした。なお、加圧の際に6名中2名は高気圧チャンパー内で1.4ATAの気圧で耳痛を起こしたため2.0ATAでの測定は不可能であったが、その他の4名は1.3ATA及び2.0ATAの両方の条件下にて測定した。

なお、1.3ATA及び2.0ATA条件を設定した理由としては、1.4ATA付近で耳痛をおこす人が多いため生体に負荷がかかりにくい1.3ATAと、一般的に治療法として使用されることが多い2.0

ATAを選択した。

4つの条件を比較するために、運動後48分の乳酸値から乳酸除去率を求め比較検討することとした。乳酸除去率は運動後48分の乳酸値を運動3分後の乳酸値から引き、その値を運動3分後の乳酸値で除してその100分率と定義した。

乳酸除去率＝

$$\frac{(\text{運動3分後の乳酸値} - \text{運動48分後の乳酸値})}{\text{運動3分後の乳酸値}} \times 100(\%)$$

4つの条件の乳酸除去率を比較検討するために、有意水準を $P < 0.05$ としてANOVAを行った。

結 果

乳酸値は、4つの条件ともに運動前の1mmol前後の値より運動3分後に約11mmolと上昇し、運動終了後は徐々に低下し運動後93分にはほとんど運動前の値まで回復した（図2）。

次に、4つの条件の運動48分後の乳酸除去率を比較した。その結果、乳酸除去率の平均値は、大気圧空気吸気61.0%、大気圧純酸素吸気64.7%、1.3ATA純酸素吸気76.0%、2.0ATA純酸素吸気

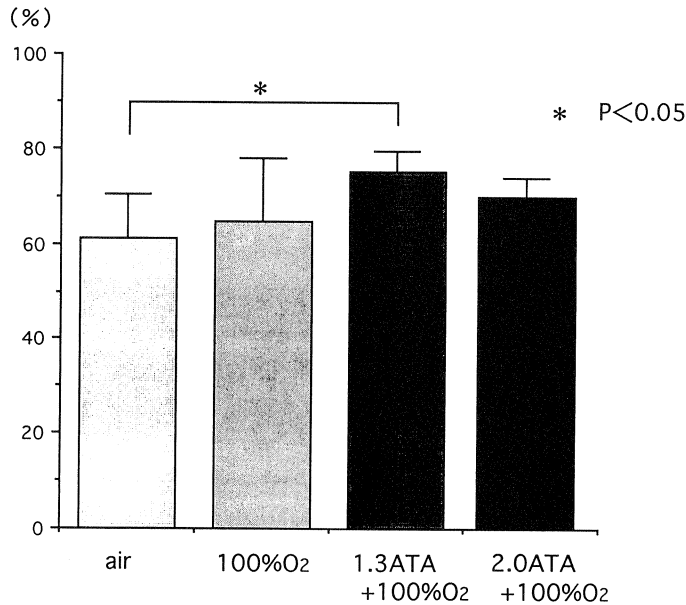


図3 乳酸除去率の比較

$$\text{乳酸除去率} = \frac{(\text{運動3分後の乳酸値} - \text{運動48分後の乳酸値})}{\text{運動3分後の乳酸値}} \times 100(\%)$$

70.0%であった(図3)。

大気圧においては、空気吸気比べて純酸素吸気の乳酸除去率はほとんど変化なかったが、1.3ATA純酸素および2.0ATA純酸素を吸気した場合には乳酸除去率は大きく、特に1.3ATA純酸素吸気では大気圧空気呼吸に比べて5%の危険率で有意差を認めた。

また、1.3ATA純酸素に比べ2.0ATA純酸素吸気の方が乳酸除去率は若干低下していたが、両者間に有意差は認められなかった。

考 察

酸素は呼吸により、肺泡より血液中に拡散し血液中のヘモグロビンと結合する。しかし、酸素解離曲線における動脈血酸素分圧(PaO₂)が100mmHg以上ではヘモグロビンの酸素飽和度は緩勾配であるために、ヘモグロビンはそれ以上ではほとんど酸素と結合できない。ところが高気圧酸素療法は、Henryの法則により血漿中の溶解酸素を増やし、より多くの酸素を末梢組織へ提供させることを可能とする方法である。そのため我々は、

大部分の乳酸が有酸素的に処理されるために、酸素を多く末梢組織に送ることにより、乳酸濃度の回復を促進させることができるかもしれないと推測して実験を行った。

大気圧における空気と純酸素吸気の乳酸除去率の比較においては、有意差は認められず、Weltmanたち¹⁾の報告と同様の結果が得られた。この理由については大気圧において純酸素を吸気し肺胞内の酸素濃度は増えたとしても、血液中ヘモグロビンはほとんど酸素と飽和しているために、ヘモグロビンの酸素運搬能力には大きな変化はなく、血漿中の溶解酸素も増えないために、末梢組織に到達される酸素の総量はほとんど変化なく、乳酸の除去に関しても影響しなかったものと思われた。以上の結果より、大気圧中での運動後の純酸素吸気は乳酸除去に関してほとんど影響しないと考えられた。

次に、我々は気圧を上昇すればするほど末梢組織に到達される酸素の総量は多くなるために、乳酸除去の速度も速くなるものと推測した。実験結果からは乳酸除去率は、大気圧空気吸気61.0%、

大気圧純酸素吸気64.7%, 1.3ATA 純酸素吸気76.0%, 2.0ATA 純酸素吸気70.0%が得られた。以上の結果より, 1.3ATA および, 2.0ATA と気圧を上昇した場合には, より多くの酸素を末梢組織まで運搬するために, 大気圧の場合に比べて乳酸除去率が上昇したものと考えられた。

しかし, 1.3ATA と2.0ATA 純酸素吸気の乳酸除去率を比較すると2.0ATAの方が比較的低い傾向を示していた。この原因としては酸素量の増大に伴って活性酸素が増加し, 生体内組織の酵素, 補酵素などの働きが阻害され, LDH などのデハイドロゲナーゼに存在する-SH 基が不活性化され, 乳酸除去の速度が遅くなったことが考えられる²⁾⁻⁵⁾。そのため, 乳酸からピルビン酸に変化する際の酵素 (LDH) だけでなく, TCA 回路内の酵素活性も低下したために乳酸除去率が低下したものと考えられる。

また, Bean & Halgi⁶⁾は, イヌの実験で乳酸値が1.0ATA 純酸素付加ではほとんど変化しなかわずかに低下するのに対し, 5ATA においては上昇したと報告し, この理由について高気圧による細胞損傷が細胞内酸性化がおり乳酸を増加させたものと推論している。

また, Eichenholz たち⁷⁾は, 過換気による動脈血のPCO₂の低下と乳酸の上昇は関係があると述べ, 過換気による呼吸性アルカローシスの代償として代謝性アシドーシスをもたらし, 乳酸やピルビン酸が上昇することを報告している。

このように, 血液の酸素量が増加することによる乳酸除去に対する効果は認められるものの, 逆に気圧の上昇や酸素量が増加することにより, 生じた活性酸素による酵素活性の低下や高気圧による細胞損傷, および代謝性アシドーシスが生じ, 乳酸上昇をもたらしていることも考えられる。以上のことを考えると, 高気圧酸素療法の乳酸除去に及ぼす影響は, 促進および遅延因子が複雑に絡み合って除去速度を決定していることが推測された。

さて, 我々は今回運動直後より座位安静の状態にて回復させたが, 運動後の体位変化や軽い運動をすることによっても乳酸除去速度に影響を及ぼすことも考えられた。一般には運動後に座位の乳酸濃度が安静時のレベルに近づくのには1時間あるいはそれ以上の時間を要するとされている

が⁸⁾, 我々の実験においても同様の結果であった。しかし, 実際には軽い運動を行った方が乳酸除去は早く⁹⁾⁻¹¹⁾, 運動後30分の乳酸除去速度に関する実験において, 運動回復初期の数分間は $\dot{V}O_2\max$ の60%の運動を行い, 中期の10分間は40%の運動を行い, そしてその後の十数分間は20%の運動をすると最も早く乳酸が除去されるという報告もある¹²⁾。

このような結果を考えると, われわれの行った実験に加えてさらに乳酸除去を早めるためには, 運動後に軽い運動をしながら環境圧を加え純酸素を付加すると, より一層早期に乳酸は除去されるものと推測される。しかもその環境圧は2.0ATAにまで上げる必要はなくストレスの比較的少ない1.3ATA程度でも十分であると考えられた。

今後, 高気圧酸素療法の運動後疲労回復の促進に対する効果および弊害について, さらなる検討が必要であると思われる。

ま と め

今回我々は, 高気圧酸素療法の最大運動後の乳酸濃度に及ぼす影響について検討した。

1. 大気圧においては, 空気呼吸に比べて純酸素吸気による乳酸除去率はほとんど影響なかったが, 1.3ATA 純酸素および2.0ATA 純酸素を吸気した場合には乳酸除去率は大きく, 特に1.3ATA 純酸素吸気では大気圧空気呼吸に比べて有意差を認めた ($P < 0.05$)。

2. 1.3ATA 純酸素に比べ2.0ATA 純酸素吸気の方が乳酸除去率は若干低下していたが, 両者の間に有意差は認められなかった。

【参 考 文 献】

- 1) Weltman A, Stamford B A, Moffatt R J, Katch V L: Exercise recovery, lactate removal, and subsequent high intensity exercise performance. Res Quart, 48:786-796, 1977
- 2) Smith G: Therapeutic application of oxygen at two atmospheres pressure. Dist chest, 45: 15-23, 1964
- 3) Stadie W C, Riggs B C, Hauggard N: Oxygen poisoning. Am J Med Sci, 207: 84-114, 1944
- 4) Sies Helmut: 活性酸素と疾患. 井上 正康監訳, 学会出版センター, 東京, 1987, 247-279
- 5) 笹本 浩, 高木 康, 太田保世: Hyperbaric Oxy-

- generation. 呼吸と循環, 12(12):860-871, 1964
- 6) Bean J W, Halgi J: Alternation in blood lactic acid as a result of exposure to high oxygen pressure. *Am J Physiol*, 102: 439-447, 1932
 - 7) Eichenholz A, Multhausen R O, Anderson W E, Macdonld F M. Primary hypocapnia: a cause of matabolic acidosis. *J Appl Physiol*, 17: 283-288, 1962
 - 8) Karlsson J, Saltin B: Oxygen deficit and muscle metabolites in intermittent exercise. *Acta Physiol Scand*, 82: 115-122, 1971
 - 9) Gisolfi C G, Robinson S, Turrell E S: Effect of aerobic work performed during recovery from exhaustive work. *J Appl Physiol*, 21: 1767-1772, 1966
 - 10) Hermansen L, Vaage O: Lactate disappearance and glycogen synthesis in human muscle after maximal exercise. *Am J Physiol*, 233: E422-E-429, 1977
 - 11) Fox L Edward: *Sports physiology*. Saunders college publishing, 1984, 58-84
 - 12) 池上晴夫: *健康のためのスポーツ医学*. 講談社, 東京, 1991, 229-236